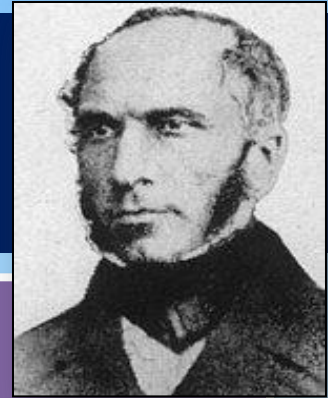


# **HIDRODINAMIKA AIR TANAH**



# Pergerakan air tanah



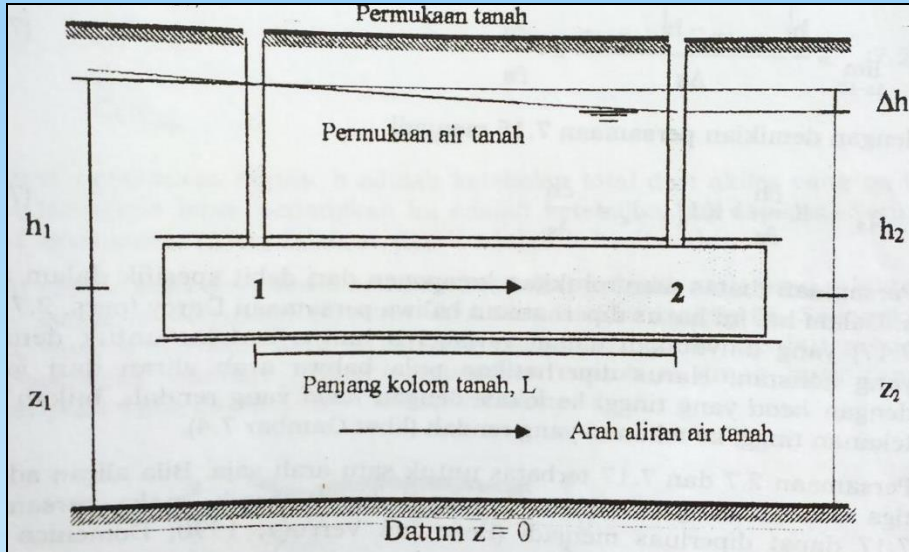
## Pendahuluan

- Merupakan bagian dari siklus hidrologi.
- Permeabilitas merupakan sifat penting dalam kaitannya dengan mobilitas air tanah.
- Konsep permeabilitas diketahui melalui konsep aliran yang dirumuskan oleh **Henry Darcy (1856)**
- Hukum Darcy juga digunakan untuk menganalisa pergerakan air tanah yang umumnya bergerak dengan aliran yang relatif lambat (kondisi laminar)

## Eksperimen Darcy

- Dalam eksperimennya, Darcy menemukan hubungan proporsional antara debit aliran air ( $Q$ ) yang melalui pasir (homogen) dengan luas penampang aliran ( $A$ ) dan kehilangan energi (gradien kehilangan energi atau gradien hidrolis),  $J = (h_1 - h_2)/L$

# Hukum Darcy



$$Q = K.A. (h_1 - h_2)/L$$



$$q = K.J$$

$$q = K.\Delta h/L$$

$q$  adalah fluk air =  $Q/A$  ( $m^3/m^2/detik$ )

- $h_1$  dan  $h_2$  masing-masing adalah head hidrolis dari titik 1 dan titik 2.
- $K$  adalah konduktifitas hidrolis (m/det)
- $A$  adalah luas penampang kolom pasir
- $Q$  adalah debit air dalam kolom pasir
- Kehilangan energi karena gesekan, antara air dengan butiran pasir  $\Delta h = h_1 - h_2 \rightarrow J$  adalah **gradien hidrolis**, maka  $J = \Delta h/L$

# Pembatasan Hukum Darcy

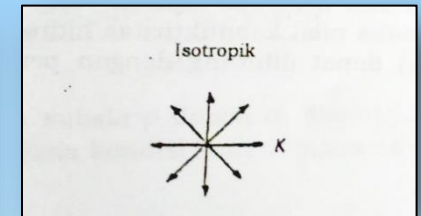
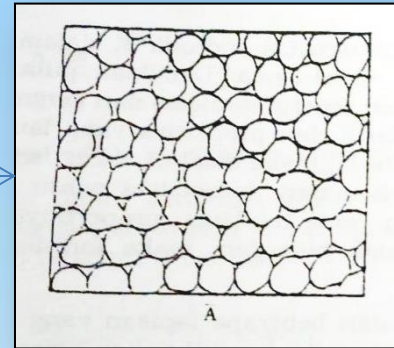
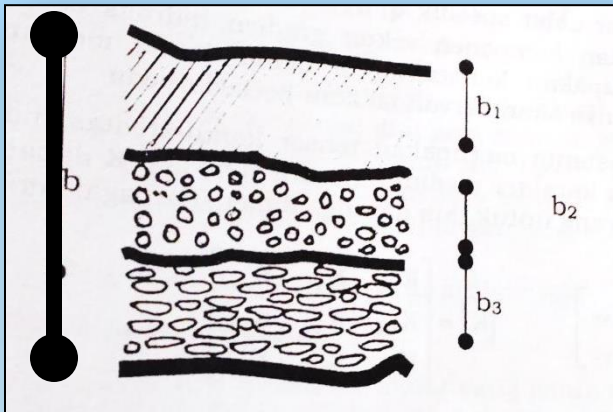
Hukum Darcy merupakan prinsip yang digunakan, baik pada gerak air tanah di zona jenuh maupun tidak jenuh. Namun hukum Darcy dapat diterapkan dengan ketentuan sebagai berikut:

- 1) Hukum Darcy hanya berlaku **untuk tanah yang homogen** dan **isotropis**. Isotropis yaitu sifat tanah ke segala arah sama atau homogen dari atas sampai kebawah.
- 2) Kontinuitas volume air yang **masuk** ke volume kontrol **tidak sama** dengan volume yang **keluar**, tanpa menghiraukan volume kontrol. Kalau volume tetap hukum darcy **tidak berlaku**.
- 3) Volume **tanahnya tidak berubah**, bagi tanah yang mengembang dan mengkerut tidak berlaku Hukum Darcy.
- 4) Hukum darcy hanya berlaku pada **aliran Laminer, aliran turbulen tidak berlaku**.

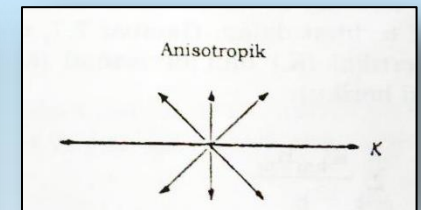
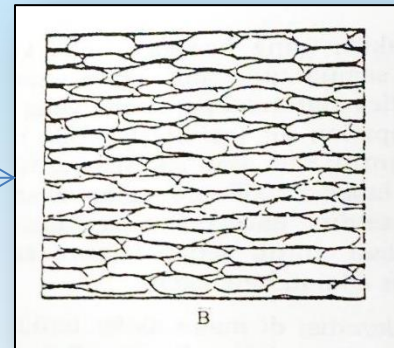


# Isotropis dan Anisotropis

Akifer yang terdiri dari berbagai lapisan



$$K_y = K_x = K_z$$



$$K_y \neq K_x \neq K_z$$

$$\overline{K_h} = \sum_{m=1}^n \frac{K_{hm} b_m}{b}$$

$$\overline{K_v} = \frac{b}{\sum_{m=1}^n \frac{b_m}{K_{vm}}}$$

# Permeabilitas – Konduktifitas Hidrolis

- Permeabilitas = kemampuan suatu media untuk melewati atau meloloskan air, yang diukur berdasarkan pada suatu unit kecil tertentu.

$$\text{permeabilitas, } k = \frac{\text{volume}}{\text{m}^2 / \text{satuan head}}$$

- Kemampuan tanah untuk melewati air disebut KONDUKTIFITAS HIDROLIK (K) yang memiliki satuan sama dengan KECEPATAN (unit panjang/satuan waktu)
- K di dalam media isotropis didefinisikan sebagai **kecepatan spesifik aliran melalui media berbutir dalam setiap unit gradien hidrolis** → dalam m/hari bila Q dalam m<sup>3</sup>/hari, h dalam m, A dalam m<sup>2</sup>, L dalam m

- Besarnya nilai K suatu jenis tanah tergantung pada sifat padatan (diameter butir dan porositas efektif) dan sifat cairan (kekentalan kinematis,  $\nu$ )
- Semakin besar diameter butir tanah maka nilai K semakin besar → tanah liat, K nya rendah

$$K = k.g/\nu$$

Dimana : K = konduktifitas hidrolis; k = permeabilitas; g percepatan gravitasi;  $\nu$  = kekentalan kinematis

**k** merupakan sifat intrinsik dari medium sehingga sering disebut sebagai **permeabilitas intrinsik** dengan satuan **Darcy**,  $1 \text{ Darcy} = 10^{-8} \text{ cm}^2$

# Kisaran harga K untuk beberapa jenis tanah

Jenis Tanah	Harga K (m/hari)
Liat (permukaan)	0.01 - 0.2
Liat bagian dalam ( <i>deep clay beds</i> )	$10^{-8}$ - $10^{-2}$
Lempung permukaan ( <i>surface</i> )	0.1 - 1.0
Pasir halus	1.0 - 5.0
Pasir sedang	5.0 - 20
Pasir kasar	20 - 100
Kerikil (gravel)	100 - 1000
Pasir berkerikil	5.0 - 100
Campuran liat, pasir dan kerikil	0.001 - 0.1

**Sumber:** Bouwer (1978)



# Kapasitas Penyimpanan Akifer

- Bila head hidrolis atau permukaan air akifer yang jenuh air turun, maka air yang ada dalam akifer tsb akan dikeluarkan. Sebaliknya bila permukaan air naik, maka air tersebut akan disimpan dalam akifer.
- Kapasitas suatu unit akifer untuk menahan (menyimpan, storage) atau mengeluarkan air akibat perubahan head hidrolis disebut sebagai **kapasitas penyimpanan akifer**.
- Sifat dari kapasitas penyimpanan suatu akifer dinyatakan dengan **koefisien penyimpanan ( $S$ )** yang didefinisikan sebagai *volume air yang dilepas atau disimpan oleh suatu akifer untuk suatu satuan luas ( $m^2$ ) per satuan perubahan tinggi head hidrolis ( $m$ ).*

# Kapasitas Penyimpanan Akifer

- Untuk akifer tertekan, butiran tanah atau pasir mengalami perubahan bentuk akibat tekanan air (sifat kompresible air) sehingga terjadi perubahan ukuran pori.
- Dalam kasus akifer tertekan dikenal istilah **koefisien penyimpanan spesifik ( $S_s$ )** yang didefinisikan sebagai volume air yang dilepaskan ( $\text{m}^3$ ) per unit volume akifer ( $\text{m}^3$ ), per satuan penurunan head hidrolis (m)

$$S_s = \rho_w \cdot g \cdot (\alpha + n \cdot \beta)$$

$$S = S_s \cdot b$$

$\rho_w$  = densitas air ( $\text{kg.m}^3$ )

$g$  = percepatan gravitasi

$\alpha$  = kompresibilitas bagian padat akifer ( $\text{m}^2/\text{N}$ )

$n$  = porositas

$\beta$  = kompresibilitas air ( $\text{m}^2/\text{N}$ )

$b$  = ketebalan akifer

$S_s$  = koefisien penyimpan spesifik ( $\text{m}^{-1}$ )

$S$  = koefisien penyimpanan (tanpa satuan)

# Kapasitas Penyimpanan Akifer

- Pada **akifer bebas**, maka permukaan head atau permukaan air akan menentukan volume air yang dilepaskan.
- Pelepasan air yang disimpan dinyatakan sebagai **specific yield ( $S_y$ )** yaitu volume air yang dilepaskan atau disimpan ( $m^3$ ) dari suatu unit luas akifer ( $m^2$ ) per satuan unit perubahan head hidrolis (m).

**Tabel 7.1** Nilai *spesific yield* beberapa material tanah

<b>Jenis batuan</b>	<b><i>Spesific yield</i> (%)</b>
Kerikil kasar	23
Kerikil sedang (medium)	24
Kerikil halus	25
Pasir kasar	27
Pasir sedang (medium)	28
Pasir halus	23
Lanau ( <i>silt</i> )	8
Liat ( <i>clay</i> )	3
Batu pasir berbutir halus	21
Batu pasir berbutir sedang	27
Batu kapur ( <i>limestone</i> )	14
Pasir dari bukit pasir ( <i>dune sand</i> )	38
Tanah loess	18
Gambut ( <i>peat</i> )	44
Schist	26
Tufa	21
Siltstone	12

**Sumber :** Domenico dan Schwartz (1990)



# Transmisivitas Akuifer (Keterlulusan)

- **Transmisivitas** adalah suatu ukuran yang menyatakan kemampuan suatu unit akuifer untuk mentransmisikan air secara horizontal dalam kondisi jenuh dengan gradien hidrolis (J) sama dengan satu.
- Transmisivitas (T) adalah hasil kali konduktifitas hidrolis dengan ketebalan akuifer jenuh, b.

$$T = b \cdot K$$

- Satuan T tergantung dari satuan K ( $\text{m}^2/\text{detik}$  atau  $\text{m}^2/\text{hari}$ )

# Kondisi Aliran Air Tanah

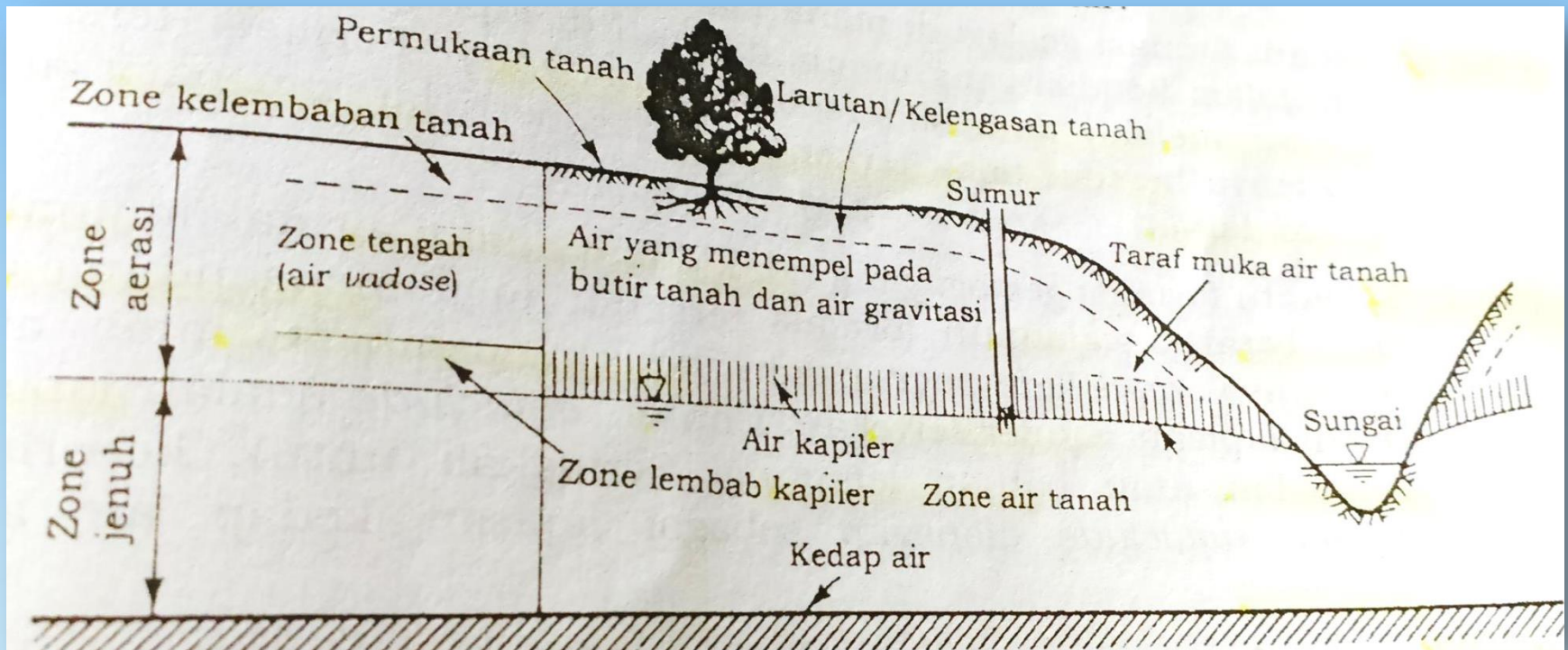
Dilihat dari kondisi **kadar air** nya, aliran airtanah dapat dibagi menjadi dua, yaitu:

- 1) Aliran dalam kondisi aliran **air tanah tidak jenuh** (*unsaturated*) → zona *vadose* atau zona aerasi
- 2) Aliran dalam kondisi aliran **air tanah jenuh** (*saturated*)

Keduanya berbeda berdasarkan nilai permeabilitas atau konduktivitas hidrolisnya.

- 1) Pada aliran jenuh bersifat homogen sehingga konduktifitas hidrolisnya konstan.
- 2) Pada aliran tidak jenuh konduktivitas hidrolisnya tergantung pada kadar air dimana difusifitas air pada front basah dapat mempengaruhi kadar air.

# Pembagian zona dari air tanah dan kelembaban tanah



- Bagian atas tanah merupakan bagian kandungan air tanah tidak jenuh dan bagian bawah adalah tanah dengan kondisi jenuh.
- Batas kedua zona aliran tersebut bersifat gradual, dimana lebar bagian transisi tergantung dari tekstur tanah → Semakin halus tektur tanah, maka bagian zona transisi semakin lebar .
- Aliran pada kondisi tidak jenuh dapat dikatakan hanya mempunyai arah gerakan vertikal.

# Konsep Energi pada Air Tanah

- Air tanah memiliki energi dalam bentuk:
  - Energi mekanik
  - Energi termal
  - Energi kimia
- Energi yang dimiliki oleh air tanah dapat berbeda dalam pengertian ruang (berbeda dari satu lokasi ke lokasi lainnya) → Air bergerak dari energi yang tinggi ke energi yang rendah untuk menyamakan energinya.
- Energi dalam air tanah juga diperlukan untuk mengatasi hambatan antara molekul air dengan butiran tanah.
- Dalam kondisi yang ditemui di alam, energi yang menggerakkan air adalah energi potensial (gravitasi) dan energi tekanan → permasalahan disederhanakan dengan menganggap temperatur konstan, sehingga aliran dikontrol oleh energi mekanik saja.



# Energi

- Energi = kapasitas untuk melakukan kerja (W)  
 $W = F \cdot d$  (Newton.meter atau Joule) dimana  
 $F$  = gaya (Newton) dan  $d$  = jarak (m)
- Berdasarkan Hukum Newton kedua, maka:  
 $F = m \cdot a$  (Newton)  
(massa, kg dikalikan dengan percepatan gravitasi,  $m/det^2$ )
- Energi yang dimiliki oleh air yang bergerak terdiri atas energi **kinetik**, energi **potensial**, dan energi **tekanan**.

# Energi Kinetik

- Setiap zat yang bergerak memiliki energi kinetik:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

$E_k$  = energi kinetik (Joule)

$m$  = massa (kg)

$v$  = kecepatan, m/det

# Energi Potensial

- Energi yang dimiliki oleh suatu benda (zat) pada ketinggian tertentu,  $z$  diatas datum ditulis sbb:

$$W = F.d = m.g.z$$

$z$  = tinggi dari titik fluida di atas datum (m)

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/det^2$ )

- Energi yang dimiliki air pada ketinggian  $z$  disebut sebagai energi potensial gravitasi (sering disebut sebagai **energi potensial** saja)

# Energi Tekanan

- Tekanan adalah gaya yang bekerja pada satuan unit luas tertentu:

$$P = F/A$$

$P$  = tekanan ( $\text{N/m}^2$  atau Pascal)

$F$  = gaya (N)

$A$  = luas bidang tegak lurus arah gaya yang terkena gaya ( $\text{m}^2$ )

$P = \text{N/m}^2 \rightarrow \text{N/m/m}^3$  : Energi per satuan volume dari fluida



# Persamaan Bernoulli

- Total energi yang dimiliki oleh air yang bergerak:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot z + P$$

- Bila energi tersebut direpresentasikan sebagai satu satuan volume, maka massa air dalam satuan volume setara dengan densitasnya ( $\rho$ ), sehingga:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2 + \rho_w \cdot g \cdot z + P$$

$$E_m = \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z + P / \rho_w$$

 **Persamaan  
Bernoulli**

# Pada Kondisi Tunak (Steady)

- Pada kondisi steady, tidak ada perubahan kondisi terhadap waktu, maka nilai  $E_m$  akan konstan.
- Bila persamaan  $E_m$  dibagi dengan  $g$  maka akan diperoleh:

$$v^2/2g + z + (P/\rho_w)/g = \text{konstan}$$

- Persamaan diatas menyatakan energi per satuan berat  
→ satuannya menjadi lebih sederhana yaitu m (meter)  
→ potensi total energi air tanah disebut sebagai “**head**” dengan satuan yang sama yaitu tinggi kolom air dalam meter.
- **Head hidrolis** sering disebut sebagai **piezometer** = memiliki potensi energi yang sama

# Head Hidrolis

- **Head hidrolis** merupakan variabel yang penting dalam menganalisa aliran air tanah.
- Pada akifer tertekan, maka bila kita memasang tabung yang menembus akifer tersebut, head hidrolis digambarkan sebagai muka air yang terjadi pada tabung tersebut.
- Pada akifer bebas (*phreatic*), head hidrolis ekuivalen dengan tinggi muka air, dengan komponen yang diperhitungkan hanyalah elevasi ( $z$ ) yang merupakan gabungan energi potensial dan energi tekanan → umumnya air tanah bergerak sangat lambat sehingga energi kinetik diabaikan.

- Persamaan untuk menghitung head hidrolis pada akifer bebas :

$$h = z + (P/\rho_w)/g \text{ .....(1) dalam meter}$$

- Untuk air yang diam atau bergerak sangat lambat, tekanan pada satu titik akan setara dengan berat air di atasnya per satuan luas dan ditulis dengan persamaan:

$$P = \rho_w \cdot g \cdot h_p \text{ .....(2)}$$

dimana  $h_p$  adalah tinggi air (meter)

- Substitusi persamaan (2) ke persamaan (1) diperoleh nilai head hidrolis sbb:

$$h = z + h_p \text{ .....(3) dalam meter}$$

- Dengan demikian head hidrolis (*piezometric head*) yang diukur sebagai ketinggian muka air atau piezometer merupakan variabel penting dalam aliran air tanah.



# Potensial Gaya ( $E_m$ )

$$E_m = \frac{1}{2}.v^2 + g.z + P/\rho_w$$

➡ Energi total per satuan massa

- $E_m$  sebagai potensial gaya, umumnya ditulis dalam simbol huruf Yunani  $\phi$  :

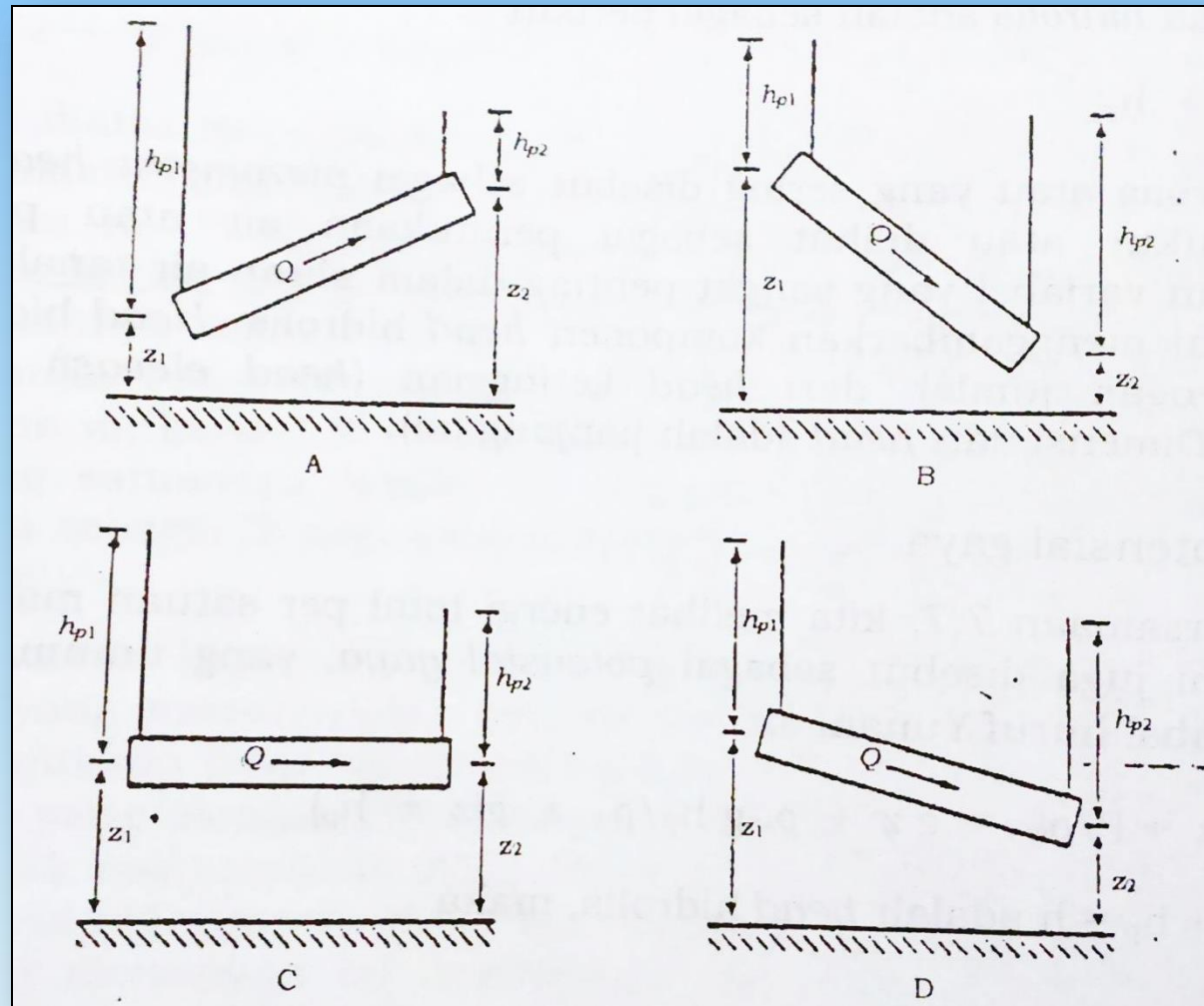
$$\phi = 0 + g.z + P/\rho_w$$

$$\phi = g.z + \rho_w.g.h_p/\rho_w$$

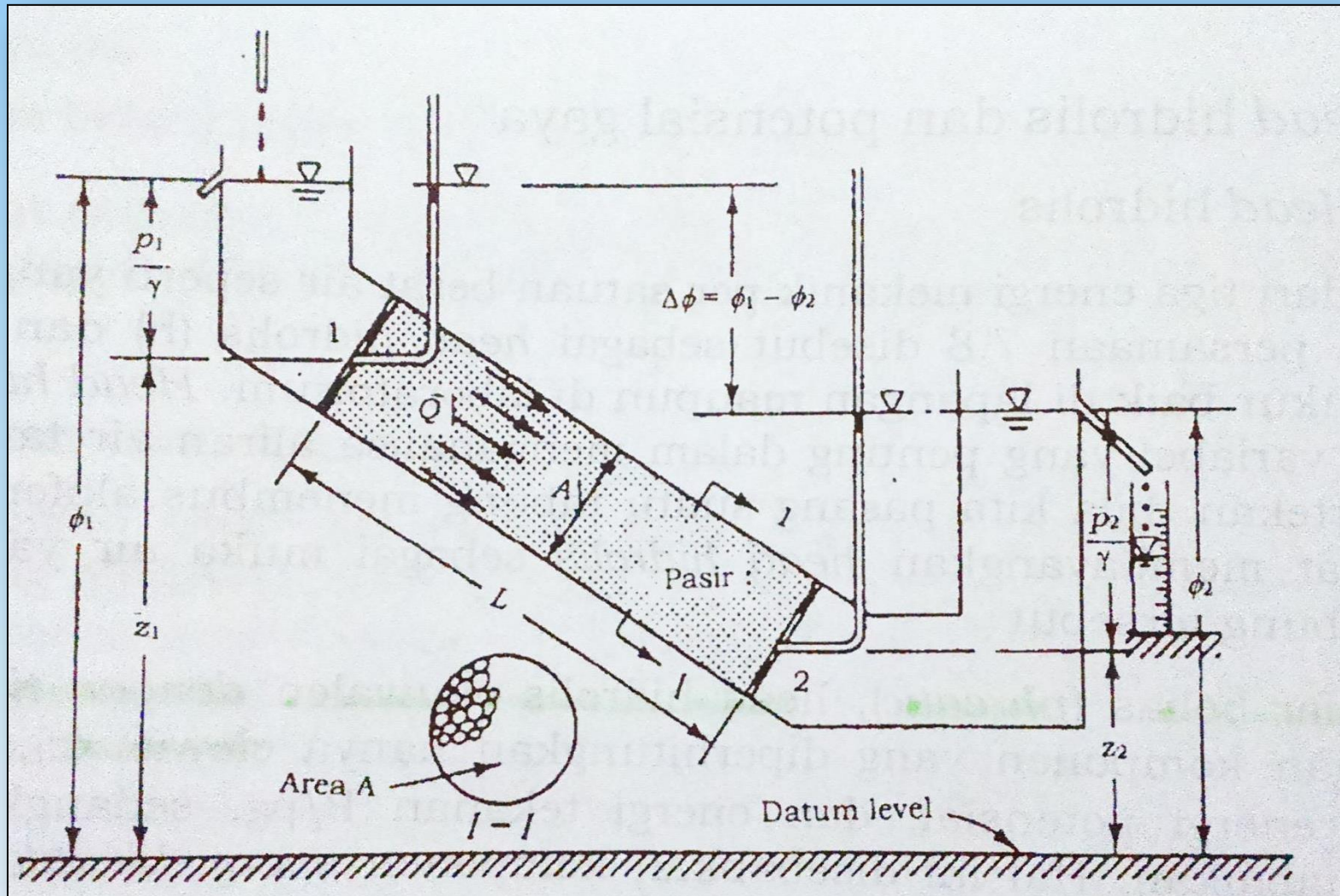
$$\phi = g(z + h_p)$$

$$\phi = g.h$$

- Potensial gaya  $\phi$  merupakan *driving force* gerakan air tanah.
- Karena nilai  $g$  dianggap konstan, maka  $h$  merupakan penentu *driving force* aliran air tanah.
- Arah aliran ditentukan oleh head (dari head tinggi ke head rendah), tanpa dipengaruhi oleh kemiringan.



# Head hidrolis dan komponennya



# **PERSAMAAN GERAK AIR TANAH**



## **Pergerakan air tanah pada zona tidak jenuh**

**Penting diketahui karena:**

- 1) Merupakan zona tempat terjadinya reaksi intensif antara kontaminan atau pencemar dengan partikel tanah karena tanah pada zona permukaan umumnya lebih reaktif.**
- 2) Proses biologis terjadi lebih intensif daripada di zona jenuh, terutama proses-proses aerobik.**





**Fenomena Transport kontaminan yang melibatkan gerakan air dalam kondisi tidak jenuh antara lain:**

- 1) Aliran lindi dari landfill.**
- 2) Rembesan tangki septik, pestisida, dan pupuk yang disebarkan ke permukaan tanah.**
- 3) Tangki penyimpanan yang bocor sehingga menyebar melalui zona aerasi hingga ke permukaan air tanah**



## Variabel-variabel yang mempengaruhi gerakan airtanah pada zona tidak jenuh:

- 1) Kadar air ( $\theta = V_w/V$ )
- 2) Tingkat kejenuhan ( $S_w = V_w/V_v$ )
- 3) Tekanan kapiler
- 4) Head tekanan
- 5) Kapasitas lapang (*field capacity*) = Kadar air yang tertinggal dalam tanah
- 6) Permeabilitas sebagai fungsi kadar air dan tekanan (konduktifitas hidrolik dan head hidrolis)
- 7) Temperatur

# Pergerakan air tanah pada zona jenuh

Dibagi menjadi:

- 1) Aliran dalam akifer tertekan (***confined***) yaitu aliran dalam akifer yang dibatasi oleh lapisan kedap air pada atas dan bawahnya.
- 2) Aliran dalam akifer semi tertekan yaitu aliran yang terjadi dalam akifer yang bocor (***semiconfined***) dimana lapisan yang membatasi akifer tersebut tidak sepenuhnya kedap air (*semipervious*).
- 3) Aliran dalam akifer bebas (***phreatic***) yaitu aliran yang terjadi dalam akifer yang mempunyai permukaan air tidak tertekan.

## Persamaan gerak air tanah pada zona jenuh

- Gerakan air tanah pada kondisi jenuh selain mengikuti **hukum Darcy** juga mengikuti **persamaan kontinuitas** (hukum kekekalan massa).
- Persamaan gerak sebagaimana fenomena fisika pada umumnya dinyatakan dalam persamaan diferensial, dimana dalam koordinat ruang  $x$ ,  $y$ ,  $z$  dan waktu  $t$  adalah variabel bebas.

## 1.1 Persamaan Gerak Air pada Akifer Tertekan

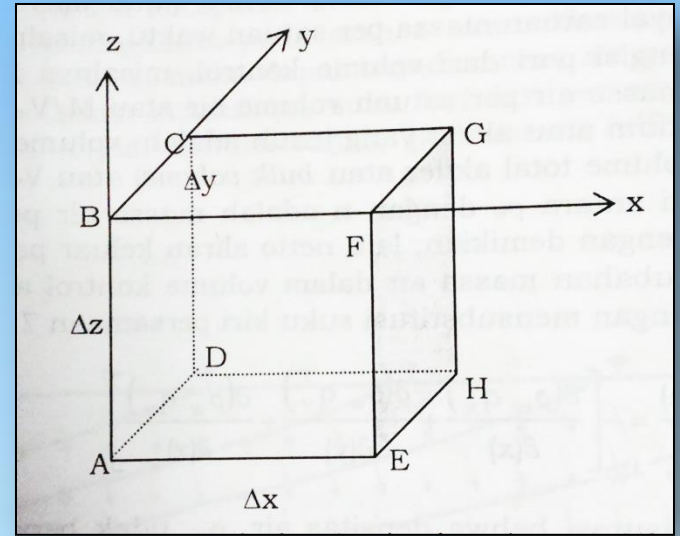
Prinsip kekekalan massa untuk suatu sistem menyatakan bahwa:

***Laju massa masuk – massa keluar =  
perubahan massa dalam sistem  
sebagai fungsi waktu***





- Kubus ABCDEFGH sebagai suatu “kontrol volume” yang mewakili satu unit akifer.
- Sisi-sisi kubus adalah  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ , dan  $\Delta z$ .



- Laju inflow massa air melalui bidang ABCD adalah  

$$= \rho_w \cdot q_x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$
- Laju outflow massa air melalui bidang EFGH:  

$$= \left[ \rho_w \cdot q_x + \left\{ \frac{\partial(\rho_w \cdot q_x)}{\partial x} \right\} \Delta x \right] \cdot \Delta y \cdot \Delta z$$
- Laju netto aliran arah sumbu x adalah perbedaan inflow dan outflow

$$= - \frac{\partial(\rho_w \cdot q_x) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}{\partial x}$$

Dengan cara yang sama dapat diperoleh :

- Laju netto outflow aliran arah sumbu y (melalui bidang CDHG) adalah:

$$= - \frac{\partial(\rho_w.q_y).\Delta x.\Delta y.\Delta z}{\partial y}$$

- Laju netto outflow aliran arah sumbu z (melalui bidang BCGF) adalah:

$$= - \frac{\partial(\rho_w.q_z).\Delta x.\Delta y.\Delta z}{\partial z}$$

- Laju netto outflow aliran untuk seluruh volume kontrol

$$= - \left[ \frac{\partial(\rho_w.q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w.q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w.q_z)}{\partial z} \right] \Delta x. \Delta y. \Delta z$$

- Laju netto outflow per satuan volume:

$$= - \left[ \frac{\partial(\rho_w.q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w.q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w.q_z)}{\partial z} \right]$$

- Hasil kali antara  $\rho_w$  dan  $n$  adalah massa air per satuan volume total akifer  $\rightarrow$  laju netto aliran keluar per satuan volume akifer atau perubahan massa air dalam volume kontrol akifer dapat ditulis sbb:

$$\frac{\partial(\rho_w \cdot n)}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(\rho_w \cdot q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_w \cdot q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_w \cdot q_z)}{\partial z} \right]$$

- Dengan asumsi densitas air  $\rho_w$  tidak bervariasi terhadap ruang, maka persamaan diatas dapat diubah menjadi:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w \cdot n)}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(q_z)}{\partial z} \right]$$

- Dengan  $q_i$  merupakan debit spesifik sesuai dengan definisi Darcy:  $q = K \cdot J \rightarrow q = K \cdot \Delta h / L$  maka persamaan diatas mjd:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w \cdot n)}{\partial t} = K \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right] = K \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right]$$

- Untuk kondisi steady :

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

**Persamaan LAPLACE** merupakan salah satu persamaan yang penting dalam aliran air tanah

- Untuk kondisi unsteady:

$$\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial(\rho_w \cdot n)}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

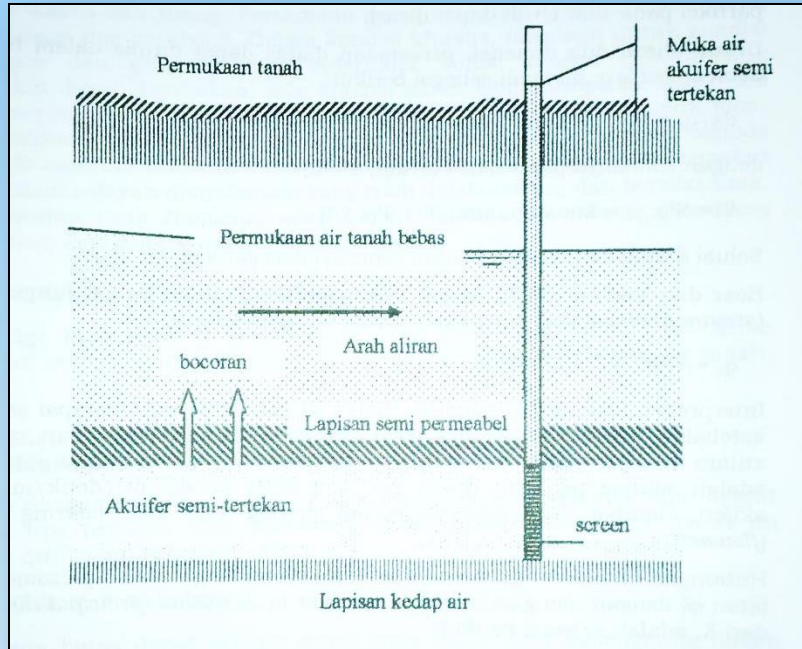
$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

**Aliran unsteady (transient)**  
tiga dimensi

- Untuk dua dimensi, dimana akifer dengan ketebalan  $b$  (m) dan  $T = K \cdot b$  (transmisivitas), maka:

$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = \frac{S_s}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

## 1.2 Persamaan Gerak Air untuk Akifer Tidak Tertekan



$$\left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right] = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$$

$h$  adalah tinggi piezometrik dari suatu bidang dasar yang dianggap datar dan  $S_y$  adalah specific yield

Bila bidang dasar tidak datar (miring), misalnya mempunyai ketinggian  $\eta$  dari datum dan ada kebocoran, maka persamaan diatas menjadi:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y (h - \eta) \frac{\partial h}{\partial y} \right] \right\} + w + \frac{\phi - h}{c} = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

$w$  = penambahan ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{detik}$ );  $\phi$  = tekanan pada batas bawah aquitard yang terletak pada dasar akifer yang bocor (m),  $h$  = tinggi piezometrik dari akifer bebas (m), dan  $c = b'/K'$  merupakan tahanan dari aquitard dimana  $b'$  = tebal aquitard (m) dan  $K'$  = permeabilitas aquitard (m/detik)